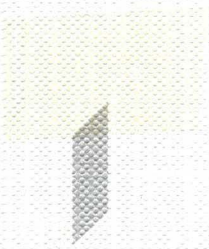


Investigation on Structural Behaviour of
Open Sandwich Steel Plate-Concrete Composite Slabs

单面钢板-混凝土组合板的 受力性能研究

吴丽丽◎著



中国建筑工业出版社

Investigation on Structural Behaviour of
Open Sandwich Steel Plate-Concrete Composite Slabs

单面钢板-混凝土组合板的
受力性能研究

吴丽丽◎著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

单面钢板-混凝土组合板的受力性能研究/吴丽丽
著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2017. 11
ISBN 978-7-112-21314-6

I. ①单… II. ①吴… III. ①混凝土结构-钢梁-
组合结构-受力性能-研究 IV. ①TU398

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 248814 号

本书是作者多年的相关科研课题的研究总结, 原创性高, 书中的观点独到。全书共包括: 第 1 章概述; 第 2 章钢板-混凝土组合板的弹性剪切屈曲性能研究; 第 3 章单面钢板-混凝土组合板的受弯承载性能及变形分析; 第 4 章钢板-混凝土组合板的受剪承载性能研究。

本书适合建筑结构专业的科研人员、设计人员以及高校的师生阅读使用。

责任编辑: 张伯熙

责任设计: 李志立

责任校对: 王宇枢 李欣慰

单面钢板-混凝土组合板的受力性能研究

吴丽丽 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

环球东方 (北京) 印务有限公司印刷

*

开本: 787×960 毫米 1/16 印张: 10 字数: 177 千字

2018 年 4 月第一版 2018 年 4 月第一次印刷

定价: 55.00 元

ISBN 978-7-112-21314-6

(31038)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

作者简介：



吴丽丽，清华大学博士，博士后。自 2009 年开始在中国矿业大学（北京）任教，于 2010 年晋升为副教授。2015~2016 年间在美国加州大学洛杉矶分校做访问学者，现任中国矿业大学（北京）建筑工程系主任兼党支部书记，同时也是中国钢结构协会结构稳定与疲劳分会理事。近年来主要致力于钢结构稳定、建筑幕墙柔性支撑体系的抗风性能、钢-混凝土组合结构的受力性能、地下工程软岩支护结构以及装配式结构等相关领域的研究。先后主持了 1 项国家自然科学基金（青年基金）项目、2 项面上基金项目、中国博士后科学基金和博士后基金特别资助等多项纵向课题的研究；在外文刊物、国内核心期刊和国内外学术会议上以第一、第二作者共发表论文 60 余篇（其中 SCI 收录 5 篇，EI 收录 25 篇），并以第一发明人获国家发明专利 5 项、实用新型专利 9 项，已出版专著一部，参编国家规范《钢筒仓技术规范》GB 50884。研究成果获得省部级科学技术二、三等奖 3 项。

前 言

钢-混凝土组合结构是在钢结构和钢筋混凝土结构基础上发展起来的一种新型结构,它利用了钢结构和混凝土结构的优点,以达到充分利用材料特性的目的。经过几十年的研究及工程实践,钢-混凝土组合结构已经发展成为既区别于传统的钢筋混凝土结构和钢结构,又与之密切相关和交叉的一门结构学科,其结构类型和适用范围涵盖了结构工程应用的各个领域。由于组合概念的应用非常广泛灵活,既可以包括不同材料之间的组合作用,也可以包括不同结构体系之间的组合作用,因此在实践和研究中产生了多种组合结构类型。目前钢-混凝土组合结构的主要形式包括组合梁、组合楼板、组合桁架、组合柱等组合承重体系以及组合斜撑、组合剪力墙等组合抗侧力体系,应用领域包括高层及超高层建筑、大跨桥梁、地下工程、矿山工程、港口工程以及组合加固和修复工程等。迄今为止,国内外学者对组合板、组合梁,型钢混凝土结构、钢管混凝土结构等已进行了许多深入细致的理论分析和试验研究工作。钢-混凝土组合板是最基本的组合结构类型之一,它最早应用于欧美国家的建筑结构领域。当时主要把压型钢板作为浇筑混凝土的永久性模板及施工操作平台,并能多层立体作业,加快施工进度。钢板-混凝土组合板近年来在建筑及桥梁领域逐渐受到关注。它是指在预制成型的钢板上熔焊栓钉抗剪连接件,在栓钉上部设置钢筋网,然后浇筑混凝土,通过栓钉抗剪连接件将钢板与后浇混凝土组合成整体,混凝土可充分发挥其抗压性能,钢板可抵抗底板平面内各个方向的拉应力,栓钉起到传递钢板与混凝土板之间的剪力且防止二者分离的作用。它的构造简洁,形式合理,施工经济快捷,无支模工序,易于满足桥梁的平面形状要求,抗裂性能及抗震性能较好,目前正逐渐广泛运用于建筑及桥梁结构的新建、加固与改造中,并显示出良好的应用前景。但是当前对于它的理论研究工作还远远滞后于工程实践,国内外目前尚缺乏相关的研究成果和专门针对这种组合板的设计方法,对其稳定问题、破坏机理和受力性能还缺乏深入的认识。根据初步分析,钢板-混凝土组合板研究仍存在诸多亟待解决的问题,例如:钢板-混凝土组合板的稳定性能;钢板-混凝土组合板的抗弯性能、抗剪性能及设计计算方法;钢板-混凝土

组合板的刚度、变形性能及计算方法等。针对上述问题,本课题组综合运用数学、力学和现代试验技术及计算分析手段,对钢板-混凝土组合板的基本受力性能 and 设计方法开展研究,建立了一些实用的设计计算方法,研究成果丰富了组合板构件的设计内容,将有助于促进这种组合板技术的推广应用,期望对我国建筑、桥梁结构领域组合结构的发展提供参考。

作者及其课题组完成的工作和取得的主要成果如下:

(1) 钢板-混凝土组合板的整体和局部屈曲性能研究方面。主要包括以下内容:①通过理论分析、有限元和数值计算,建立了防止钢板-混凝土组合板发生整体和局部弹性屈曲的分析模型,并对其关键参数进行了分析,给出了可供设计参考的混凝土板最小厚度、栓钉最大间距等实用计算公式。②在保证栓钉所连接的钢板不发生局部屈曲的前提下,根据夹层板理论,通过在钢板与混凝土板之间设置假想的剪切薄层,模拟钢板-混凝土组合板界面滑移效应,建立考虑滑移效应的组合板分析模型,推导出四边简支矩形组合板在均匀受剪状态下的整体弹性屈曲方程。③分析表明,当剪切刚度较小时,组合板的剪切屈曲荷载增长速度较快,随着剪切刚度的增大,剪切屈曲荷载的变化逐渐趋于平缓,并接近完全剪力连接组合板的屈曲值。④通过参数分析拟合了防止完全剪力连接四边简支组合板发生整体屈曲所需混凝土板的最小厚度计算公式,可供工程设计参考。⑤采用有限元计算方法,在混凝土板具有足够厚度以保证组合板不发生整体屈曲的基础上,通过模型参数分析,研究钢板-混凝土组合板在纯剪切作用下发生局部屈曲的特征,建立具有典型边界条件的单块钢板计算模型来近似模拟组合板中钢板的局部屈曲特性;利用该钢板模型的屈曲荷载与组合板中钢板局部屈曲荷载的数值关系,推导出四边简支组合板栓钉连接最大间距的计算公式,计算结果略偏保守。

(2) 钢板-混凝土组合板的受弯性能和变形分析方面。主要包括:①先后开展了两批试件(5个组别)共11块钢板-混凝土组合板的静力加载试验。第一批4组9个试件的试验结果表明,破坏方式主要有钢板剥离破坏、混合破坏、剪切破坏三种。通过栓钉作为抗剪连接件,钢板与混凝土板能够有效地形成组合截面共同工作,在加载的过程中,截面纵向应变沿板件高度基本符合平截面假定,剪力连接程度、混凝土板厚度对组合板承载力的影响比较大,而钢板厚度的变化对其影响较小。第二批2个试件增加了试件的跨高比的变化因素,进行截面弯剪验算,以求试件呈现弯曲破坏。通过观察钢板-混凝土组合板在弯曲破坏下的受力特性,从中总结出相应的特征和规律。②利用有限元软件 ANSYS 对钢板-混凝土组合板

进行了有限元分析,模拟了构件加载的全过程,对影响钢板-混凝土组合板性能的主要参数进行了分析,包括栓钉间距、钢板厚度、混凝土板厚度、剪跨比、试件的长宽比。分析结果表明,提高剪力连接程度可以使钢和混凝土的材料性能得到充分发挥,组合板的抗弯承载力随着钢板厚度、混凝土板厚度的增大而增大;加载点越靠近支座,组合板的长宽比越小,组合板的抗弯承载力越大。截面分析法对于分析完全剪力连接的钢板-混凝土组合板效果良好。③分析了钢板-混凝土组合板受弯时交界面的滑移情况,建立了界面剪力的函数,进而推导了跨中挠度的计算公式;分别从截面分析、折减刚度系数和《混凝土结构设计规范》GB 50010 等不同角度探讨了钢板-混凝土组合板的抗弯承载力计算方法,并将计算结果与试验值进行了对比。④试验结果表明,钢板-混凝土组合板在受到弯曲荷载作用下的破坏模式主要有钢板剥离破坏、弯剪破坏、剪切破坏和弯曲破坏四种。从钢板-混凝土组合板截面抗弯及抗剪承载力的角度出发,通过变化试件的剪跨比,进行大量的数值计算,总结板件的破坏模式,分别找出跨中单点加载以及跨中两点加载的情况下剪跨比对钢板-混凝土组合板破坏模式的影响规律,并提出各破坏模式下剪跨比的阈值。

(3) 钢板-混凝土组合板的组合抗剪性能研究方面。共设计了 6 个组合板试件,其中 2 个是小跨度试件,用于验证侧立组合板抗剪试验的可行性;其后设计的 4 个是一般跨度试件。试件的变化参数主要是剪跨比和栓钉间距,试验主要分析了这两种因素对钢板-混凝土组合板抗剪承载力的影响。而在有限元仿真模拟中,考虑到有限元软件默认的为固定裂缝模型,该模型无法模拟裂缝的剪切软化行为,用于分析混凝土抗剪承载力时无法达到准确性要求。基于 ABAQUS 软件具有开放的二次接口,采取转动裂缝模型对有限元软件进行材料层面的二次开发,建立钢板-混凝土组合板有限元分析的抗剪模型。主要结果如下:①小跨度试验验证了组合板抗剪加载方案可行,最终的破坏形态主要是斜压破坏,试验中混凝土的抗剪承载力实测值为计算值的 2~4 倍,钢板承担的剪力占构件整体剪力的 50%左右。试验结果与 ANSYS 模拟结果的对比表明,固定裂缝模型是无法模拟抗剪混凝土软化问题的,需进行改进。②对 3 块钢板-混凝土组合板和 1 块无钢板混凝土板进行的抗剪承载性能试验研究表明,钢板-混凝土组合板在单点加载情况下可能发生的破坏形态包括:弯曲破坏和斜拉破坏, $\lambda \geq 2.63$ 时呈现弯曲破坏。组合板的极限承载力是无钢板混凝土板极限承载力的 3 倍左右。组合板中钢板所承担的剪力约为组合板极限抗剪承载力的 43%,且混凝土板承担的剪力比规范中混凝土抗剪计算值提高了 2

倍左右,表明由于钢板的作用,混凝土板的承载力大大提高。③修正压力场理论可以较好地描述混凝土的软化行为,采用 UMAT 子程序对 ABAQUS 进行二次开发,选择合适的钢板和栓钉单元类型和材料属性,并将修正压力场理论应用到钢板-混凝土组合板的抗剪数值模拟当中,建立组合板数值仿真抗剪模型。将试验结果和有限元抗剪模型模拟结果进行对比,建立了钢板-混凝土组合板抗剪计算的数值模型,数值计算结果与有限元计算结果吻合较好。④采用组合板抗剪数值模型对影响其抗剪承载力的主要因素进行分析表明:影响钢板-混凝土组合板抗剪承载力的主要因素为钢板厚度、混凝土厚度以及构件截面高度等。⑤基于普通混凝土梁抗剪承载力计算公式,通过参数分析拟合出钢板-混凝土组合板抗剪承载力的简化计算公式,试验结果与拟合公式的计算结果吻合较好,可为组合板抗剪承载力设计方法的研究提供理论依据。

本书的研究工作先后得到国家自然科学基金(青年基金项目)(50808110)、国家自然科学基金面上项目(51278488)、中国博士后科学基金(20080430042)及中国博士后科学基金特别资助(200801083)。在此还要衷心感谢我的博士后合作导师中国工程院院士、清华大学聂建国教授对我的悉心指导,导师渊博的学识、严谨的治学态度、孜孜不倦的敬业精神、开拓创新的思维方法等将成为我一生中最宝贵的财富。本书在撰写过程中还得到了土木工程界技术人员的大力支持,在此我表示诚挚的谢意。

在课题研究的过程中,本课题组硕士研究生张栋栋、余珍、邢瑞蛟、姜宇鹏、严茂超、王芮、郭开凤、刘艳、安丽佩等协助我完成了大量的试验、计算及分析工作,王琳、吕步凡、谢灵慧、琚祥凯等对本书的编辑做了大量工作,他们均对本书的完成做出了重要贡献。在此向为本书付出劳动和做出贡献的朋友们表示诚挚的感谢。

本书仅在单面钢板-混凝土组合板的受力性能方面开展了一部分研究工作,今后还需要在双面钢板-混凝土组合板以及多种边界条件下等更多方面开展相关工作,由于实际结构工程的复杂度和作者认识能力的局限性,本书难免存在不足之处,某些观点和结论也不够完善,需要在今后的研究工作中加以改进,欢迎广大读者提出批评和建议。

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 钢板-混凝土组合板的构成与特点	1
1.2 钢板-混凝土组合板的应用概况	4
1.2.1 钢板-混凝土组合板在建筑结构中的应用	4
1.2.2 钢板-混凝土组合板加固技术及其在新型组合梁桥中的应用推广	6
1.3 钢板-混凝土组合板的研究进展	11
1.3.1 钢板-混凝土组合板的弯剪性能研究	11
1.3.2 双钢板-混凝土组合构件的性能研究方面	13
1.3.3 栓钉抗剪连接件研究	15
1.3.4 钢-混凝土组合结构刚度分析	17
1.3.5 亟待开展研究的主要问题	17
第 2 章 钢板-混凝土组合板的弹性剪切屈曲性能研究	19
2.1 钢板-混凝土组合板整体弹性屈曲分析	20
2.1.1 钢板-混凝土组合板分析模型	20
2.1.2 平衡微分方程的建立	22
2.1.3 四边简支矩形组合板的弹性剪切屈曲分析	26
2.1.4 界面剪切刚度对组合板屈曲的影响	31
2.1.5 完全剪力连接简支矩形组合板中混凝土板最小厚度	33
2.2 钢板-混凝土组合板的弹性局部剪切屈曲及关键参数分析	34
2.2.1 钢板-混凝土组合板的弹性局部剪切屈曲特性	34
2.2.2 斜向钢板的计算模型及相关参数分析	37
2.2.3 四边简支组合板栓钉最大间距的计算公式	38
2.3 小结	41
第 3 章 单面钢板-混凝土组合板的受弯承载性能及变形分析	43
3.1 单面钢板-混凝土组合板受弯承载性能试验研究	43
3.1.1 试验目的和内容	43
3.1.2 试件设计	44

3.1.3	试件制作	46
3.1.4	材料性能	47
3.1.5	试验装置及加载方案	49
3.1.6	测点布置及数据采集	50
3.1.7	试验结果及分析	54
3.2	钢板-混凝土组合板受弯承载力的影响因素及破坏模式分析 ...	71
3.2.1	有限元模型的建立	71
3.2.2	试验验证	74
3.2.3	各参数变化对组合板承载力及变形性能的影响	76
3.2.4	组合板在受弯状态下的破坏模式分析	78
3.3	考虑界面滑移的钢板-混凝土组合板受弯状态下的刚度分析及 挠度计算	81
3.3.1	钢板-混凝土组合板内力分析	81
3.3.2	基于折减刚度法的钢板-混凝土组合板位移计算方法	85
3.3.3	基于宽度折减系数的钢板-混凝土组合板位移计算方法	86
3.3.4	试验验证	88
3.4	简支钢板-混凝土组合板的受弯承载力分析	89
3.4.1	截面分析法	89
3.4.2	考虑界面滑移效应的极限抗弯承载力分析	92
3.4.3	极限抗弯承载力的简化计算方法	95
3.5	小结	99
第4章	钢板-混凝土组合板的受剪承载性能研究	101
4.1	小跨度钢板-混凝土组合板的抗剪承载性能试验	101
4.1.1	试件设计及制作	101
4.1.2	材料性能	102
4.1.3	试验加载方案及测点布置	102
4.1.4	试验现象	104
4.1.5	试验结果及分析	105
4.1.6	与有限元计算结果的对比	107
4.2	钢板-混凝土组合板的抗剪承载性能试验	108
4.2.1	试件设计	108
4.2.2	试件制作	109
4.2.3	材料性能	110

4.2.4 试验加载装置及测点布置 111

4.2.5 抗剪试验现象及结果 114

4.2.6 构件承载力分析 118

4.3 基于修正压力场理论的钢板-混凝土组合板抗剪承载性能的
数值仿真分析 120

4.3.1 修正压力场理论 120

4.3.2 有限元模型的建立 123

4.3.3 UMAT 子程序开发 126

4.3.4 有限元与试验结果的对比验证 130

4.4 简支钢板-混凝土组合板抗剪承载力的参数分析 133

4.4.1 抗剪承载力影响因素分析 134

4.4.2 钢板-混凝土组合板抗剪承载力一般计算公式 136

4.5 小结 140

参考文献 142

第 1 章 概 述

1.1 钢板-混凝土组合板的构成与特点

钢-混凝土组合结构是在钢筋混凝土结构和钢结构的基础上日益发展起来的一种新型的结构形式,最早产生于 20 世纪初期,世界各国学者对其开展了大量的研究,20 世纪 30 年代抗剪连接件的出现,使得组合结构获得广泛的应用并不断发展创新,组合结构能充分利用钢材和混凝土各自的材料性能。目前常用的钢与混凝土组合结构分为 5 大类,分别为压型钢板与混凝土组合楼板、钢与混凝土组合梁、型钢混凝土结构、钢管混凝土结构和外包钢混凝土结构。同钢筋混凝土结构相比,组合结构可以减小构件截面尺寸、减轻结构自重、降低地震作用、增大有效使用空间、降低基础造价、缩短施工周期、增加构件和结构的延性;同钢结构相比,组合结构可以减小用钢量、增大刚度、增加稳定性和整体性、提高结构的防火性和耐久性^[1-4]。使用组合结构还可以节省脚手架和模板,便于立体交叉施工,减小湿作业量,降低施工现场噪声。

钢-混凝土组合结构已经被广泛应用于高层及超高层房屋、大跨结构、桥梁结构、结构改造及加固等^[5-8]。对于跨度较大、荷载较大的钢筋混凝土结构或钢结构均可采用钢-混凝土组合结构,钢-混凝土组合结构优越的受力性能、施工性能和良好的综合效益使其成为现今结构体系的重要发展方向之一,在建筑、桥梁结构及结构加固等领域具有广阔的应用前景。我国的一些高层建筑物,尤其是超高层建筑物开始大量采用组合构件或整个结构体系全部采用组合结构。比较有代表性的采用钢-混凝土组合结构的超高层建筑有环球金融中心、金茂大厦、地王大厦、赛格广场大厦等,结构中采用了型钢混凝土巨型组合柱、剪力墙核心筒以及组合楼板的组合结构技术。另外,珠海科技园连体结构、滨州国际会展中心、武汉火车站等大跨结构,上海杨浦大桥、上海闵浦大桥、东海大桥、芜湖长江大桥、青洲闽江大桥、香港汀九桥等桥梁结构则全部或部分采用了组合结构。除了

新建工程外,组合结构也被应用于地下工程和工程构件的加固及修复,比如,近年来完工的北京地区的紫竹桥改造工程,通过采用混凝土叠合技术对桥梁悬臂板进行加固,有效地提高了承载力和刚度,而且耐久性好,安全可靠。在桥梁加宽改造方面,钢-混凝土组合结构显示出了其施工方便、承载力大以及结构刚度较大等优势。近年来这种组合板形式主要用于钢板-混凝土组合板加固技术^[9-11],也有望在轨道交通组合梁桥结构^[12-13]等方面得到推广。

钢-混凝土组合结构可以由多种结构形式构成,例如组合梁、组合柱、组合板等,其中钢板-混凝土组合板是最基本的组合结构类型之一,它是指在钢板上熔焊栓钉,在栓钉附近布置钢筋网片,然后浇筑混凝土,通过栓钉等作为抗剪连接件将钢板与后浇混凝土组合而形成的整体结构。钢板代替钢筋承受拉力或压力,同时对内部混凝土有一定的约束作用,抗剪连接件可采用栓钉、开孔钢板等多种形式,内部混凝土主要处于受压状态,并对钢板有较强的约束作用,防止钢板失稳。钢板-混凝土组合板的钢板表面比较平整,可以满足外观的美观和装饰需要,主要分为以下两类:第一类是单面钢板-混凝土组合板(见图 1-1 (a)),简称组合板;第二类是双层钢板-混凝土夹层板(见图 1-1 (b)),简称双层组合板。如图 1-1 (a)所示,第一类组合板是由钢板和位于其上的混凝土通过抗剪连接件连接而成的,其中组合板中一般设置两层钢筋网片,一层靠近栓钉根部可以有效传递钢板和混凝土之间的界面剪力,另一层靠近混凝土表面可以满足温度和收缩的需要。结合钢和混凝土的优良特性,组合板可以在利用混凝土较高抗压强度的同时,通过设置钢板以弥补混凝土相对较低的抗拉强度。与传统的钢筋混凝土(RC)板相比,组合板可以更有效地将荷载转化为拉力,并且可以极大地减小板的厚度,从而用成本更低的轻质结构代替楼板和桥面板中的传统钢筋混凝土板。图 1-1 (b)中的第二类双层组合板是指“钢-混凝土-钢”夹层构件。双层组合板与双筋混凝土梁相比都具有较大的刚度,因此可以应用于要求较高侧向剪力和轴向压力的剪力墙的设计。此外,由于结构性能和较大的侧向刚度方面的优良特点,钢板可以作为组合板的支撑形式从而减少人工成本和时间,显著加快工程进度。钢板-混凝土组合板相对于其他组合楼板构造更为简洁、施工更加快捷、无支模工具、易于满足桥梁的平面形状要求,抗裂性能及抗震性能均较好,且形式合理,因此,钢板-混凝土组合板已经在建筑、桥梁和其他结构形式方面获得越来越多的关注。

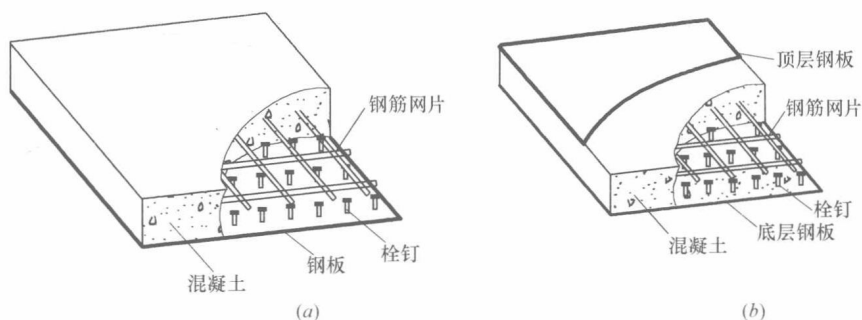


图 1-1 钢板-混凝土组合板

(a) 单面钢板-混凝土组合板；(b) 双面钢板-混凝土夹层板

钢-混凝土组合板最常用于建筑结构中的楼板中，随着钢-混凝土组合结构在工程实践中的快速发展，除了压型钢板-混凝土组合板这种常见的工程形式外，近年来逐渐发展了很多新型钢板-混凝土组合板，包括加劲钢板-混凝土组合板、肋筋模板钢-混凝土组合板以及夹层组合板，如图 1-2 所示。

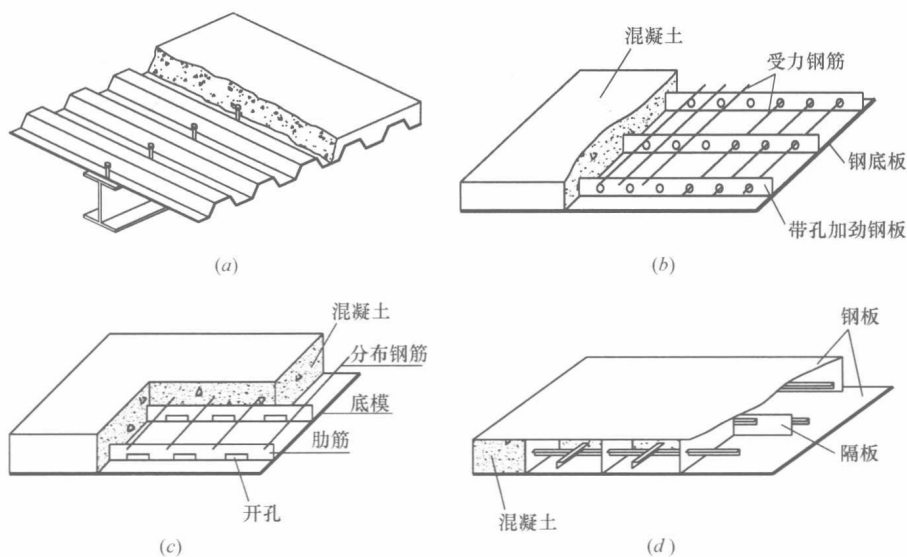


图 1-2 新型钢板-混凝土组合板

(a) 压型钢板-混凝土组合板；(b) 加劲钢板-混凝土组合板；
(c) 肋筋模板钢-混凝土组合板；(d) 夹层组合板

随着大量的试验研究和实践应用的开展及对其理论探索的不断深入,我国的科技工作者对钢板-混凝土组合板的特点、受力性能、应用等各个方面有了比较全面的认识,极大地推进了钢板-混凝土组合板在高层建筑、超高层建筑、大跨结构以及大型桥梁结构等土木工程中的应用。例如:上海金茂大厦塔楼高 421m,地上部分 88 层,结构的横向承重体系为宽翼型钢桁架梁与混凝土板所形成的钢-混凝土组合楼盖,钢梁间为厚度 1.2mm、高度 76mm 的压型钢板与 82.5mm 厚的现浇混凝土所形成的组合板;上海瑞金大厦高 107m,27 层,10 层以上为压型钢板-混凝土组合楼板;沈阳沈海热电厂的工业厂房也采用了这种组合板的形式。

1.2 钢板-混凝土组合板的应用概况

1.2.1 钢板-混凝土组合板在建筑结构中的应用

1. 组合板在建筑楼盖方面的应用

钢板-混凝土组合板最早应用于欧美国家的建筑结构领域。当时主要把钢板作为浇筑混凝土的永久性模板及施工操作平台,并能多层立体作业,加快施工进度。为了使其能承受施工时混凝土的自重及施工荷载,钢板必须具有一定的刚度,因此又将钢板压制成带凹凸肋形,但使用阶段结构的承载和变形仍只考虑钢筋混凝土板的作用。后来随着应用与研究的深入,发现压型钢板的存在可以提高板的承载能力。如果能保证压型钢板与混凝土结合很好,两者基本能够组合成整体而共同工作,这样,压型钢板能代替受力钢筋承受拉力,既可节约大量钢筋,还相应地减少了钢筋的制作安装等施工费用。20 世纪 50 年代,国外学者首次提出压型钢板-混凝土组合楼板,并于 1960 年在布鲁克林的联邦法庭大厦工程中首次使用,此后,压型钢板-混凝土组合板得到了工程界和学术界深入和广泛的研究,对其极限承载力、抗剪性能、界面滑移、挠度变形以及混凝土的开裂等问题开展了大量的理论与试验研究工作。近 20 年来我国也大量应用,既可用作楼面也可用作屋面。它具有节省模板、施工速度快、易于运输和安装、减轻楼板自重、抗震性能好等许多优点。但由于压型钢板一般较薄,所以造成有些工况下承载能力不足、防火能力较差、平面外刚度较小,并

且由于压型钢板表面难以布置足够多的剪力连接件而造成钢-混凝土之间得不到有效的抗剪连接导致承载力下降等,而钢板-混凝土组合板则能更好地解决上述问题。

Clerke 最早提出了非完全剪力连接组合板变形理论^[14]; Koichi Sato 根据薄板理论对非完全剪力连接组合板建立了偏微分方程组,得到了非完全剪力连接组合板挠度的理论解^[15];对于组合板局部稳定性的研究, Wright 根据最小势能原理推导出了与混凝土相连的钢板在轴压状态下的局部屈曲临界荷载,他认为栓钉间距范围内钢板理想边界条件为夹支边,并给出了栓钉间距与板厚之比的限值^[16-17]。UY. B 等通过推出试验和有限差分法研究了薄型钢板组合板局部稳定性^[18-19]。Liang 等对双层钢板组合板在双向轴压及双向轴压和剪切等荷载工况作用下的弹性局部稳定及屈曲后的强度进行了研究,他们认为组合板中钢板局部稳定分析模型边界条件仍应是理想简支边界,并给出了不同工况下栓钉间距与板厚之比的限值^[20-21]。

20 世纪 80 年代中期,我国制定了冶金行业标准《钢-混凝土组合楼盖结构与施工规程》YB 9238—1992。建设部行业标准《高层民用建筑钢结构技术规程》、国家标准《钢结构设计规范》以及电力行业标准《钢-混凝土组合结构设计规程》中,都对组合楼板做出了有关的设计规定和要求,钢板-混凝土组合板在高层建筑、工业厂房、大跨度结构以及大型桥梁结构等诸多领域中得到了广泛应用。

2. 组合板在组合剪力墙中的应用

当今时代高层、超高层建筑的数量迅猛增长,随着建筑层数的增加,底部剪力墙需要承担的竖向荷载越来越大,为了保证剪力墙的延性,需严格控制轴压比和混凝土强度等级,若仍采用传统的钢筋混凝土剪力墙,只能增加剪力墙的厚度,过厚的剪力墙不仅施工复杂,影响建筑使用面积、建筑经济效益,且剪力墙自重过大会导致地震作用力变大,不利于高层结构安全;另外,对于核心筒结构来说,剪力墙厚度的增加使得核心筒的刚度大幅度提高,为了满足外框柱承担楼层剪力比的要求,外框梁柱的截面也要随之增加以实现内筒和外框的刚度匹配,此时结构的整体成本和规模均难以控制,因此,高层和超高层建筑中剪力墙构造的创新和优化成为影响其发展的关键因素之一。

钢板-混凝土组合剪力墙作为一种新型剪力墙构件,能够充分发挥钢和混凝土两种材料的优点,扬长避短,有强度高承载力大的优点又可以获

得较高的延性,在保证力学性能的基础上,比传统的钢筋混凝土剪力墙厚度小,施工快速方便,这种新型构件的使用可以有效地减小构件的尺寸和建筑物自重,从而降低建筑物的地震反应和使用面积,是高层和超高层建筑中剪力墙构造的优先选择,在超高层建筑结构中应用越来越广泛。钢板-混凝土组合剪力墙有多种新型构造,常见类型包括双层钢板-混凝土组合剪力墙、内嵌钢板-混凝土组合剪力墙以及单侧钢板-混凝土组合剪力墙等。《高层建筑混凝土结构技术规程》JGJ 3—2010 及《组合结构设计规范》JGJ 138—2016 均已提出了钢板-混凝土组合剪力墙的承载力计算方法以及相关的设计、构造要求等,为钢板-混凝土组合剪力墙的应用提供了规范依据。中国国家博物馆、北京国贸三期以及北京财富中心等项目已经使用了这种钢板-混凝土组合剪力墙。

中国国家博物馆中央大厅两侧的墙体由于大空间的学术报告厅以及数码影院的需要不能落到基础上,同时该墙体又是 21m 标高及 29.8m 标高两层大跨钢桁架的支承构件,承受的竖向荷载很大,抗震性能目标为中震弹性。中震作用下底层每段墙承担的水平剪力达到 76000kN 左右,同时需要控制墙体厚度在 600mm 以内^[23],采用普通混凝土墙体不能提供足够的承载力,即使按墙体受剪截面控制条件计算的墙体厚度也要 1100mm,远远超过了建筑师允许的厚度,且延性无法保证,最后在底层采用钢板-混凝土组合剪力墙,根据钢板-混凝土组合剪力墙受剪截面承载力计算方法,计算出墙厚为 600mm,内设钢板厚度为 25mm,解决了这个问题。同时在入口大厅,标高 34.5m 以上仅 4 组混凝土筒体支承整个钢桁架屋盖,混凝土筒体部分墙肢承受的水平剪力很大,普通钢筋混凝土墙体也无法满足要求。同样由于受到建筑功能对墙厚的限制,设计中也采用了钢板-混凝土组合剪力墙,钢板厚度为 35mm^[24]。

1.2.2 钢板-混凝土组合板加固技术及其在新型组合梁桥中的应用推广

近年来,现有建筑由于自然老化、自然灾害、人为损伤等原因,使得很多还未达到使用年限甚至新落成的建筑结构显现出安全隐患,而对于某些建筑,其结构损伤情况未达到拆除重建的程度,且拆除重建会带来大量的经济损失,对于这些建筑,进行结构加固是经济可行的方法。钢板-混凝土组合板加固技术是近年来被广泛应用的加固方法,它是指以钢-混凝土